

Рис. 5. Вертикальные перемещения структурной оболочки, мм

### Заключение

- По результатам проведенного испытания установлено, что характер деформированного состояния в целом соответствует расчетным положениям, однако фактические максимальные прогибы превышают в 2,1–2,3 раза их расчетные значения. При этом фактические максимальные значения прогибов меньше допустимых значений прогибов по [2].
- В узлах сопряжения рамок верхней поясной сетки, каждый из которых выполнен только на одной высокопрочной шпильке, приложении нагрузки отмечена податливость, сопровождающаяся потрескиванием узлов за счет сдвига контактируемых поверхностей в процессе нагружения покрытия.
- Экспериментальные усилия в стержнях структуры удовлетворительно согласуются с расчетно-теоретическими значениями. Запас несущей способности стержней структурной конструкции на полную нормативную нагрузку достаточный и составляет 1,6–6,9, что обеспечивает восприятие стержнями структуры расчетных усилий от полной расчетной нагрузки.
- Конструкция после снятия испытательной нагрузки не возвратилась в первоначальное проектное положение и получила необратимые перемещения, составляющие до 60% от прогиба под

испытательной нагрузкой. В стержнях структуры после снятия нагрузки сохранились остаточные усилия, тензометры не возвратились в первоначальное положение. Уровень остаточных усилий при его суммировании с расчетными усилиями от внешних нагрузок не приводит к исчерпанию несущей способности стержней структуры.

- При осмотре конструкций металлической структурной оболочки в ходе испытаний и после снятия испытательной нагрузки каких-либо повреждений, искривлений и потери устойчивости элементов, разрушений узлов и деталей не обнаружено.

### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Нормы проектирования. Нагрузки и воздействия: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦНИИП, 1986. – 36 с.
- Нагрузки и воздействия. Дополнения. Разд. 10. Прогибы и перемещения: СНиП 2.01.07-85 / Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 8 с.
- Проект 141-1.05 КМ «Ледовая арена в г. Пружаны. Корректировка Плавательный бассейн» / ОАО «Брестпроект».
- Проект 140.08-КМД «Изготовление стадиона КМД структурной плиты для плавательного бассейна в г. Пружаны» / ОАО «Брестпроект».

21.01.09

### DRAGAN V.I., MUCHIN A.V., SHURYN A.B., LIUSTSIBER V.V. The results of the examination and as-build tests of a metal structural shell of the covering of the swimming pool and aqua park in Pruzhany

In this article basic results of the examination and as-build tests of a metal structural shell of the covering of the swimming pool and aqua park in Pruzhany are given. During the examination of the construction a number of production and assembly defects are registered. The assessment of the degree of the impact of these defects on the covering bearing capacity is given. The as-build tests of the covering are conducted and a real deflected mode of the covering by its full test loading and after a full unloading is defined.

624.012

. .

**Введение.** В теории предварительно напряженных конструкций принято считать, что измерение величины втягивания каната на

торце напрягаемого элемента является непрямым (косвенным) методом оценивания длины зоны передачи напряжений. Следует от-

**Тур Виктор Владимирович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой технологий бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.  
Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

метить, что в основном все стандарты, включая и стандарт EN 1168 [23], регламентирующие требования к проектированию и изготовлению многоспустотных плит безопалубочного формирования, предполагают этот метод контроля. В нашей статье [25] были подробно рассмотрены основные факторы, влияющие на величину длины зоны передачи напряжений.

Вместе с тем, несмотря на то, что получению зависимостей, связывающих длину зоны передачи напряжений и величину вытягивания напрягающих элементов, посвящено достаточно много работ различных исследователей, проблема по-прежнему остается неразрешенной в полной мере.

### 1. Базовые зависимости, связывающие величину вытягивания напрягающего элемента и длину зоны передачи напряжений

Экспериментально-теоретические исследования, выполненные И. Гийоном (Guyon, 1951), позволили получить следующую зависимость, связывающую длину зоны передачи напряжений с величиной вытягивания напрягающего элемента на свободном торце изделия при передаче усилия обжатия:

$$l_{pt} = \alpha \frac{\delta_e}{\varepsilon_{p,i}}, \quad (1)$$

где  $l_{pt}$  – длина зоны передачи напряжений;  $\delta_e$  – величина вытягивания каната на свободном торце изделия;  $\varepsilon_{p,i}$  – относительная деформация каната непосредственно перед передачей усилия обжатия;  $\alpha$  – коэффициент, зависящий от принятого закона сцепления и соответственно распределения напряжений в арматуре на длине зоны передачи напряжений.

Гипотетически И. Гийон рассматривал два случая:

- напряжения в канате на длине зоны передачи напряжений распределены линейно ( $\alpha = 2$ ), что означает равномерное распределение напряжений сцепления;
- напряжения в канате на длине зоны передачи напряжений распределяются по параболе, а напряжения сцепления – линейно с нисходящей ветвью (см. рис. 1), что подтверждалось опытным путем.

Исходное уравнение (1) может быть преобразовано к виду:

$$l_{pt} = \alpha \frac{E_p}{\sigma_{pm,i}} \delta_e, \quad (2)$$

где  $E_p$  – модуль упругости напрягающей арматуры;  $\sigma_{pm,i}$  – напряжение в канате непосредственно перед передачей усилия обжатия на бетон.

Следует отметить, что на протяжении ряда лет вопрос, связанный с выбором закона распределения напряжений в напрягающем элементе на длине зоны передачи напряжений остается наиболее дискуссионным.

В таблице 1 представлены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между длиной зоны передачи напряжений и величиной вытягивания каната на свободном торце.

В общем случае теоретическая величина вытягивания каната может быть определена:

$$\delta_e = \Delta_{ps} - \Delta_c = \int_0^{l_{pt}} [\varepsilon_{si} - \varepsilon_s(x)] dx - \int_0^{l_{pt}} \varepsilon_c(x) dx, \quad (3)$$

где  $\Delta_{ps}$  – полное упругое укорочение бетона на длине зоны передачи напряжений;  $\Delta_c$  – полное упругое укорочение каната на длине зоны передачи напряжений.

При линейном распределении напряжений, а соответственно и относительных деформаций в напрягающей арматуре и окружающем бетоне по длине зоны передачи напряжений, величина вытягивания каната на свободном торце элемента из уравнения (3) равняется площади заштрихованного треугольника на рис. 2, что является графической интерпретацией широко применяемого уравнения:

$$\delta_e = \frac{\sigma_{pm,i}}{2E_p} l_{pt}. \quad (4)$$

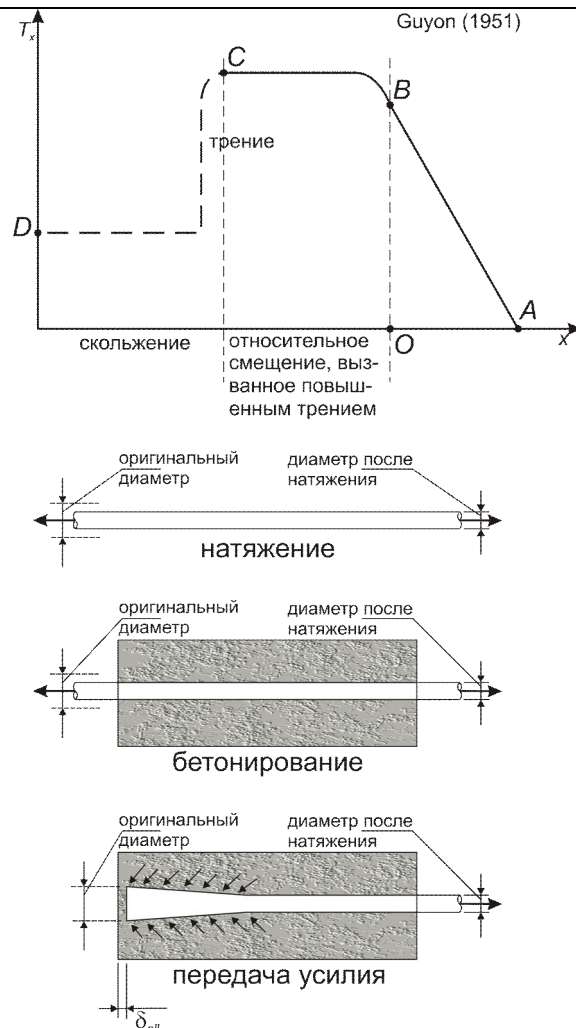
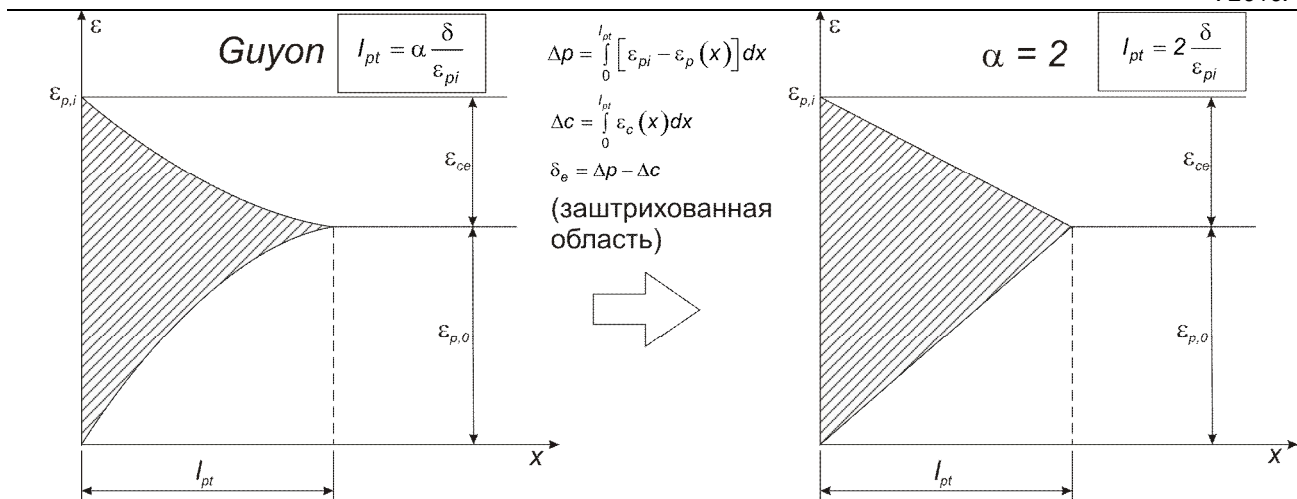


Рис. 1. Диаграмма усилия сцепления на длине зоны передачи напряжений согласно И. Гийону (1951) и "эффект Хойера" ("Hoyer effect") при передаче усилия обжатия с напрягающим канатом на бетон [3]

Таблица 1. Зависимости, связывающие длину зоны передачи напряжений с величиной вытягивания каната по предложениям различных исследователей [20]

№ п/п	Источник	Зависимость
1	Marshall, Krishnamurthy (1969)	$l_{pt} = \sqrt{\frac{\delta}{K}}$ , где $K = 0,0000035 \text{ мм}^{-1}$ для семипроволочных канатов $\varnothing = 12,7 \text{ мм}$
2	Balázs (1992)	$l_{pt} = 105 \cdot \varnothing^4 \sqrt{\frac{\delta^{3/2}}{f'_c}}$
3	Balázs (1993)	$l_{pt} = \frac{111 \cdot \delta^{0,625}}{f_{ci}^{0,15} \left( \frac{f_{pi}}{E_p} \right)^{0,4}}$
4	Rose, Russel (1997)	$l_{pt} = 2\delta \frac{E_p}{f_{pi}} + 137,16$

Рис. 2. К выводу зависимости " $l_{pt}$ "

Как уже отмечалось ранее, линейное распределение напряжений по длине зоны передачи напряжений дает теоретическое решение для  $\alpha = 2$ . Вместе с тем, опытные данные, относящиеся к испытанию элементов с канатной арматурой, показывают, что с одной стороны приведенное теоретическое решение при  $\alpha = 2$  дает как консервативный результат, когда речь идет об определении базовой длины зоны передачи напряжений, применяемой далее при расчетах по предельным состояниям первой и второй групп, так и неконсервативный результат в том случае, когда выполняется расчет некоторых предельно допустимых значений вытягивания, применяемых при контроле качества изделий. Как следует из представленного выше уравнения (4), величина вытягивания каната линейно зависит от базовой длины зоны передачи напряжений. Поэтому, завышая расчетное значение длины зоны передачи напряжений, завышается и контрольное значение величины вытягивания каната. Вместе с тем, назначение некоторых предельных значений вытягивания канатов, применяемых в процессе производственного контроля, при использовании зависимостей типа (4) выглядит достаточно простым и привлекательным. Так, измеряя величину вытягивания каната по торцам изделия в процессе производства, можно контролировать значения длины зоны передачи напряжений. Однако, как показано в работах [20, 21], зависимости типа (4) плохо применимы для элементов с низким качеством сцепления, где значительное влияние оказывают локальные потери сцепления на концах каната (рис. 1). В этом случае значительное локальное вытягивание каната, полученное по результатам измерения, может привести к неверному оцениванию и завышению длины зоны передачи напряжений.

При этом дополнительные погрешности могут вносить неточности измерения малых величин вытягивания, а также неодинаковые смещения отдельных проволок, входящих в канат.

Учитывая то обстоятельство, что к настоящему времени не предложены другие обоснованные методы контроля длины зоны передачи напряжений, метод, основанный на измерении вытягивания каната, при всех его недостатках, по-прежнему остается базовым методом при производстве большинства элементов с напрягаемой арматурой, и, в частности, плит безопалубочного формования.

Таким образом, при установлении допустимого значения вытягивания каната при использовании зависимости вида (2) необходимо обоснованно принять:

- контролируемое значение длины зоны передачи напряжений  $l_{pt}$ ;
- значение коэффициента  $\alpha$ .

В соответствии с требованиями п. 4.2.3.2.4 EN 13369 [24], относящегося к нормированию предельной величины вытягивания напрягающих элементов на свободном торце изделия, в процессе производственного контроля должны выполняться следующие условия:

- для отдельного каната  $m \geq 1,3 L_0$ ; (5)
- среднее значение для всех канатов

$$m \geq L_0. \quad (6)$$

При этом в качестве контрольной величины вытягивания для канатов следует принимать среднее из трех последовательных измерений проволок, расположенных по окружности.

В условиях (5) и (6) значение  $L_0$  (мм) согласно EN 13369 следует определять по формуле:

$$\Delta L_0 = 0,4 \frac{\sigma_{pm,0}}{E_p} l_{pt2}, \quad (7)$$

где  $l_{pt2}$  – верхнее значение расчетной длины зоны передачи напряжений, равное  $1,2 l_{pt}$ , в соответствии с требованиями норм [4, 8].

Несложно заметить, что в формуле (7) для вычисления  $L_0$  согласно EN 13369 [24] применяется множитель 0,4, соответствует коэффициенту  $\alpha = 2,5$  в зависимости (2), предложенной И. Гийоном.

**2. О выборе значения коэффициента  $\alpha$ .** Следует отметить, что на протяжении целого ряда лет вопрос, связанный как с установлением обоснованного значения коэффициента  $\alpha$  в зависимости (2), так и с выбором альтернативной зависимости, связывающей длину зоны передачи напряжений с величиной вытягивания напрягаемого элемента, остается наиболее дискуссионным и открытым. В таблице 2 представлена выборка наиболее известных предложений, относящихся к назначению величины коэффициента  $\alpha$  при использовании базового выражения (2).

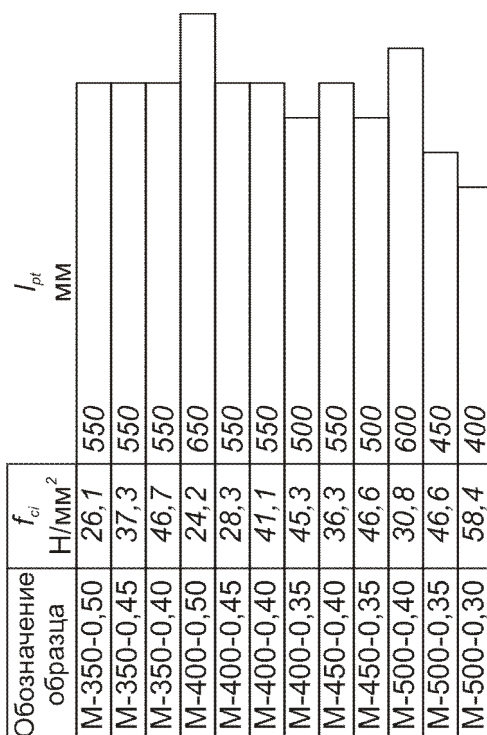
Последние исследования, выполненные J.R.Marti-Vargas и др. [20], показывают, что среди зависимостей, представленных в табл. 1, наилучший результат в сравнении с опытными данными дает наиболее простая зависимость И. Гийона (2) с коэффициентом  $\alpha = 2,44$  (см. табл. 3). При этом было установлено, что при изменении величины вытягивания в достаточно широком диапазоне (в зависимости от прочностных характеристик бетона, распределения напрягающих элементов в сечении и т.д.) были получены близкие значения длины зоны передачи напряжений. Кроме того, область изменения значений длины зоны передачи напряжений для одной и той же величины вытягивания каната довольно широкая (см. рис. 3). В исследованиях [20] сделан вывод о том, что к оценке длины зоны передачи напряжений по величине вытягивания каната на свободном конце следует относиться достаточно осторожно. Введение коэффициента  $\alpha = 2,5$  при назначении граничного значения величины вытягивания каната согласно EN 13369 [24] при выполнении производственного контроля дает более консервативный результат по сравнению с теоретическим решением  $\alpha = 2$  и приближается к значению, полученному экспериментально  $\alpha = 2,44$  в опытах [20] при широком варьировании значений базисных переменных, входящих в развернутую расчетную модель [4, 8].

**Таблица 2.** Значения коэффициента  $\alpha$  в формуле (2) И. Гийона по предложениям различных исследователей [20]

Источник	Коэффициент	
FIP (1982)	4,0	Индикативное значение при мгновенной (быстрой) передаче усилия обжатия
Guyon (1953)	3,0	Гипотетически
FIP (1982)		Принятое значение при $f_{pi}$ – непосредственно после передачи усилия
Olesiewicz (1975)	2,86	Экспериментально
FIP (1978)	2,86	Экспериментально
RILEM (1979)	2,8	Принятые значения
IRANOR (1982)		
LCPC (1999)		
Balázs (1993)	$2/(1-b)^a$	Теоретические исследования
den Uijl (1998)	от 2,3 до 2,6	Экспериментально-теоретические исследования
Jonsson (1992)	2,5	Принятое значение
Guyon (1953)	1,0	Гипотетически
Brooks et al (1988)		
Balogh (1992)		
Russel and Burns (1996)		
Logan (1997)		
Steinberg et al (2001)		
Oh and Kim (2000)		
Wan et al (2002)		
CEB-FIP (1993)		
Rose and Russel (1997)		
den Uijl (1998)		
fib (2000)		
Lopes and Carmo (2002)		

**Таблица 3.** Сравнение опытных и расчетных значений длины зоны передачи напряжений согласно [20]

Зависимость	Среднее $l_{pt,cal} / l_{pt,mean}$	Коэффициент корреляции $R^2$
(1) таблица 2	1,18	0,07
(2) таблица 2	1,17	0,54
(3) таблица 2	1,11	0,35
(4) таблица 2	1,01	0,21
ф. И. Гийона с $\alpha = 2,44$	0,95	0,20

**Рис. 3.** Опытные значения длины зоны передачи напряжений, полученные в [20] для канатов  $\varnothing 12,7$  мм при  $p_{m,i} = 1395$  МПа,  $p_{m,\infty} = 1116$  МПа,  $p_{m,i} = 196700$  МПа

**3. Расчетные модели для определения длины зоны передачи напряжений.** При назначении граничного значения вытягивания каната при контроле в соответствии с зависимостями (5) и (6) важным элементом является выбор расчетной модели для вычисления длины зоны передачи напряжений.

Следует отметить, что в нормативных документах различных стран на протяжении ряда лет было принято выражать длину зоны передачи напряжений по отношению к номинальному диаметру  $d$ . В таблице 4 представлены для сравнения рекомендуемые расчетные значения длины зоны передачи напряжений, выраженные по отношению к номинальному диаметру, по требованиям различных норм.

Повышенная длина зоны передачи напряжений, принятая в американских нормах, базируется на результатах исследований Cousins, Zia и Johnston [15], выполненных во второй половине 80-х годов прошлого столетия. Исследования показали, что нормы ACI 318 [5] недооценивают как длину зоны передачи напряжений, так и длину анкеровки канатов. Так, по сравнению со значением  $l_{pt} = 50\varnothing$ , принятым в ACI 318, измеренная длина зоны передачи напряжений для канатов  $\varnothing = 12,7$  мм составила от 1250 мм ( $99,4\varnothing$ ) до 1880 мм ( $148\varnothing$ ). По результатам этих исследований федерация FHWA опубликовала меморандум, в соответствии с которым канаты диаметром 15,2 мм были запрещены к применению без анкеров, а длина анкеровки увеличена на 60%.

Следует отметить, что результаты измерений длины зоны передачи напряжений, выполненных различными авторами (см. табл. 5), имеют значительный разброс для одинакового диаметра каната при близких прочностных характеристиках бетона к моменту передачи усилия обжатия и близких усилиях обжатия. Это, на наш взгляд, объясняется, главным образом, несовершенствами использованных

**Таблица 4.** Расчетные значения относительной длины зоны передачи напряжений  $\beta$  по нормам различных стран (для семипроволочных канатов)

Нормативный документ	Напряжения в арматуре в момент передачи усилия обжатия, МПа	Отношение длины зоны передачи напряжений $l_{pt}$ к номинальному диаметру каната ( $\beta = l_{pt} / \varnothing$ ) при средней передаточной прочности бетона $f_{cm,0}$ , МПа		
		30	40	50
ASO [6] канат $\varnothing$ 12,5 мм	1450	183 / 11,2	135 / 8,4	нет данных
ACI-318R [5]	1400	66 / 3,5 *)	66 / 3,5	66 / 3,5
BS 8110 [7]	$\leq 0,75 f_{pk}$	44 / 2,3	38 / 1,7	34 / 1,4
EN 1992-1 [8]	$\geq 1200$	70 / 3,5	60 / 2,7	нет данных
NEN 6720 [9]	1450	66 / 4,0	59 / 3,6	нет данных
PN 84/B [10]	1350	78 / 4,4	61 / 3,5	нет данных
СНиП 2.03.01 [26]	1000	63 / 3,6	53 / 2,9	–

\*) После черты приведены соответствующие средние значения втягивания каната  $\delta_{e,m}$ , мм (при  $\varnothing_{ном} = 12$  мм)

**Таблица 5.** Экспериментальные значения длины зоны передачи напряжений для канатов  $\varnothing = 12,5$  мм по данным различных исследователей [22]

№ п/п	Исследователь, источник	Тип передачи усилия обжатия	Средняя передаточная прочность бетона $f_{cm}(f)$ , Н/мм <sup>2</sup>	Кол-во опытов	Длина зоны передачи напряжений $l_{pt}$ , мм		
					$L^{\wedge}$	A	H
1	Hanson, Kaar (1959)	Резка пламенем	36,61	17	–	660,4	–
2	Kaar и др. (1963)	Резка пламенем	23,72	10	812,8	962,7	1104,9
3	Hanson (1969)	Резка пламенем	34,19	2	–	609,6	–
4	Consins и др. (1990)	Резка пламенем	29,92	20	812,8	1262,4	1879,6
5	Malik (1990) Russel, Burns	Резка пламенем	24,68	12	558,8	1066,8	1625,6
6	Unay и др. (1991) Russel, Burns	Резка пламенем	30,2	34	406,4	762,0	1117,6
7	Shahawy и др. (1992)	Резка пламенем	35,23	12	749,3	764,5	812,8
8	Mitchell и др. (1993)	Постепенная передача усилия	40,47	14	330,2	500,38	711,2
9	Consins и др. (1993)	Резка пламенем	44,88	27	685,8	1153,2	1727,2
10	Deatherage и др. (1994)	Резка пламенем	34,2	16	457,2	602,0	914,4
11	Byuno Hwan Oh и др. (2001)	Постеп. перед. (одиночн. канат)	35,0	20	–	651,0	–
12	(monostrand)		45,0	20	–	548,0	–
13	Byuno Hwan Oh и др. (2002)	Постеп. перед. (двухжильный канат)	35,0	20	–	661,0	–
14	(twinstrand)		45,0	20	–	577,0	–
15	J. Marti-Vargas и др. (2007)	Постепенно, пошагово по методу ECADA **)	от 26,1 до 54,8	48	400,0	515,0	550,0

методик измерения длины зоны передачи напряжений по зафиксированным относительным деформациям бетона. Как было показано ранее (см. раздел 2), измерения, выполненные по методике [20], позволили получить еще более противоречивые данные.

Следует отметить, что в первые редакции EC-2 (ENV-1992) были внесены таблицы, по которым длину зоны передачи напряжений предлагалось также нормировать в отношениях к номинальному диаметру каната в зависимости от величины передаточной прочности бетона и вида напрягающего элемента (см. табл. 6).

При этом, переход к расчетным значениям длины зоны передачи напряжений, как и в EN 1991-1-1 [8], осуществляется с использованием коэффициентов 0,8 и 1,2 к базовому значению, где наиболее неблагоприятное значение определяется применительно к расчетной ситуации.

Представленный выше подход, в рамках которого базовая длина зоны передачи напряжений определяется произведением  $l_{pt} = l_{pt,0}$ , имеет ряд недостатков, а главным образом, не учитывает следующих параметров:

- а) начального натяжения канатов (указано, что приведенные в таблицах 4, 6 данные справедливы для максимально возможного натяжения, но ничего не говорится о снижении длинных зон передачи напряжений для более низких уровней натяжения);
- б) способа передачи усилия обжатия (плавно/мгновенно; хотя показано, что способ передачи усилия обжатия может оказывать существенное влияние на длину зоны передачи напряжений);

в) различий в условиях сцепления в зависимости от положения напрягающих элементов в изделии;

г) различия в условиях сцепления при втягивании ("push-in") и вытравивании ("push-out") каната (ситуация "push-in" определена при передаче усилия обжатия, а "push-out" – при анкерровке в предельном состоянии по прочности);

д) различия в условиях сцепления канатов и гладких проволок.

Следует отметить, что при определении нормируемых значений  $\alpha_d$  внесенных в ENV 1992-1-2, было использовано параболическое распределение напряжений на длине зоны передачи напряжений, в то время как в EN 1992-1-2 [8], вслед за MC90, принято, по утверждению авторов [16], "более реалистичное" линейное распределение. При этом окончательная редакция EN 1992-1-2 (п. 8.10.2) [8] содержит метод расчета, практически полностью повторяющий метод MC90 (п. 6.9.11) (см. табл. 7).

Согласно EN 1992-1-1 [8] и СНБ 5.03.01 [4] базовую длину зоны передачи напряжений следует определять по формуле:

$$l_{pt} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \frac{\sigma_{pm,0} \cdot \varnothing}{\eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}(t)}, \quad (8)$$

где  $\alpha_1 = 1,0$ ;  $\alpha_2 = 0,19$ ;  $\eta_1 = 1,0$ ;  $\eta_{p1} = 3,2$  – для канатов;  $f_{ctd}(t)$  – расчетное сопротивление бетона на растяжение к моменту времени  $t$ , соответствующему передаче усилия обжатия.



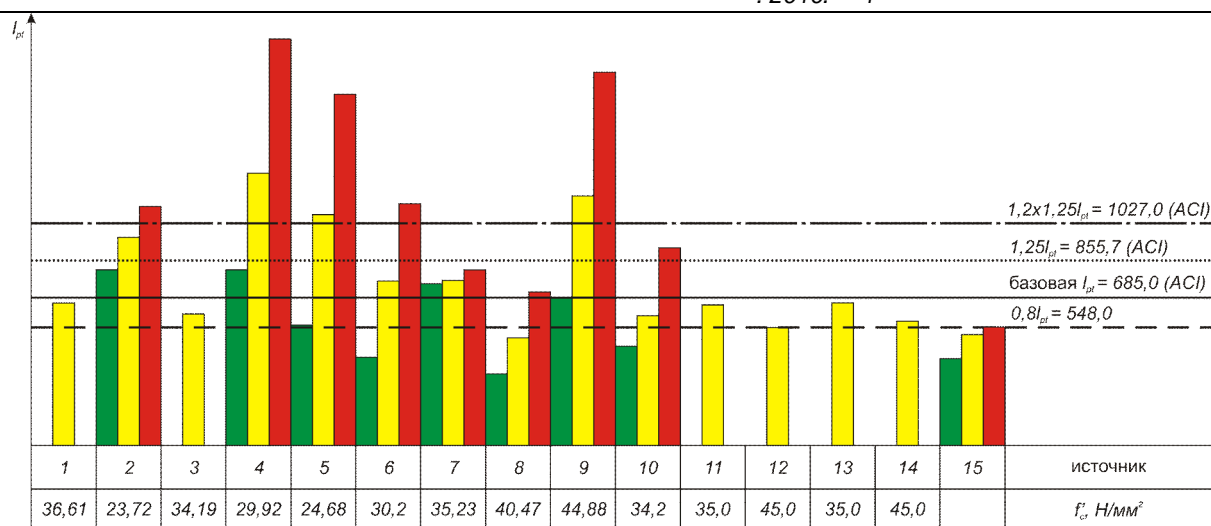


Рис. 4.

Таблица 6. Значения коэффициента  $b$  для расчета базовой длины зоны передачи напряжений согласно EN 1992-1-2

Средняя прочность бетона к моменту передачи усилия обжатия, в МПа		25	30	35	40	45	50
$b$	канаты, гладкая проволока	75	70	65	60	55	50
	рифленая проволока	55	50	45	40	35	30

Таблица 7. Сравнение расчетных зависимостей для определения длины зоны передачи напряжений по MC90 и EN 1992-1-1

Параметр	MC90, п. 6.9.11	EN 1992, п. 8.10.2
Базовая длина анкеровки	$l_{bp} = \frac{A_{sp} f_{pd}}{\pi \phi f_{bpd}},$ <p>где</p> $\frac{A_{sp}}{\pi \phi} = \left(\frac{1}{4}\right) \phi - \text{для круговых}$ $\frac{A_{sp}}{\pi \phi} = \left(\frac{7}{36}\right) \phi - \text{для 7-проволочных канатов}$ <p><math>f_{bpd}</math> – расчетное значение прочности сцепления</p>	Не используется как отдельный параметр в п. 8.10.2
Прочность сцепления при передаче усилия обжатия	$f_{bpd} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{ctd}(t),$ <p>где</p> $\eta_{p1} = 1,4$ – для проволок $\eta_{p1} = 1,2$ – для 7-проволочных канатов $\eta_{p2} = 1,0$ – хорошие условия сцепления $\eta_{p2} = 0,7$ – другие условия сцепления $f_{ctd}(t)$ – расчетное значение прочности на растяжение	$f_{bpt} = \eta_{p1} \eta_{p2} f_{ctd}(t),$ <p>где</p> $\eta_{p1} = 2,7$ – для проволок $\eta_{p1} = 3,2$ – для 7-проволочных канатов $\eta_{p1} = 1,0$ – хорошие условия сцепления $\eta_{p1} = 0,7$ – другие условия сцепления
Длина зоны передачи напряжений	$l_{bpt} = \frac{8 \eta_8 \eta_9 \eta_{10} \eta_{pi}}{f_{bpd}},$ <p>где</p> $\eta_8 = 1,0$ – плавно $\eta_8 = 1,25$ – мгновенно $\eta_9 = 1,0$ – для анкеровки $\eta_9 = 0,5$ – для передачи напряжений $\eta_{10} = 0,7$ – гладкие проволоки $\eta_{10} = 0,5$ – канаты $\eta_{pi}$ – напряжения в арматуре непосредственно после передачи усилия обжатия	$l_{pt} = \frac{\eta_1 \eta_2 \eta_{pi}}{f_{bpt}},$ <p>где</p> $\eta_1 = \eta_8$ , MC90 $\eta_2 = 0,25$ – для круглых $\eta_2 = 0,19$ – для 7-проволочных канатов

Подставляя соответствующие значения коэффициентов в ф. (8), применительно к предварительному напряжению канатами получаем базовую длину зоны передачи напряжений:

$$l_{pt} = 1,0,19 \frac{\sigma_{pm,0}}{1,0 \cdot 3,2 \cdot f_{ctd}(t)} \phi = \frac{\sigma_{pm,0}}{16,84 \cdot f_{ctd}(t)} \phi. \quad (9)$$

Принимая для передаточной прочности бетона  $f_{c,cube}(t) = 40$  МПа значение  $f_{ctd}(t) = 1,35$  МПа, расчетная длина зоны передачи напряжений составит:

$$l_{pt} = \frac{\sigma_{pm,0}}{22,73} \phi. \quad (10)$$

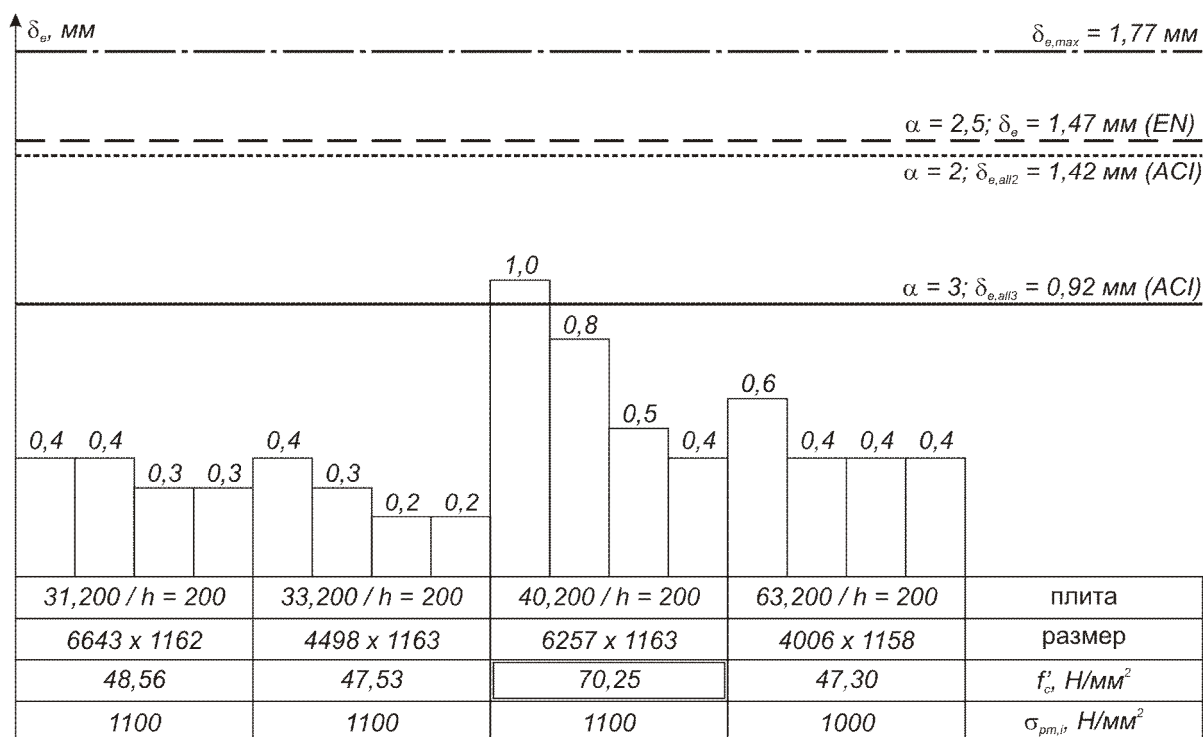


Рис. 5.

Здесь уместно сравнить полученную зависимость (10) с зависимостью, предлагаемой ACI 318 [5] для плит безопалубочного формирования:

$$l_{pt} = \frac{\sigma_{pm, \infty}}{20,7} \cdot \varnothing, \quad (11)$$

где  $\sigma_{pm, \infty}$  – напряжения в напрягаемой арматуре с учетом всех потерь (эффективные напряжения).

Как видно из сравнения, полученные зависимости дают достаточно близкий результат при передаточной прочности бетона не менее 40 МПа.

С учетом полученной длины зоны передачи напряжений ACI 318 [5] для плит безопалубочного формирования предлагает определять два предельных значения величины втягивания канатов на базе зависимости (2):

$$\delta_{e, \text{all}} = \frac{1}{41,4} \frac{\sigma_{pm, i}}{E_p} \sigma_{pm, \infty} \cdot \varnothing \text{ при } \alpha = 2; \quad (12)$$

$$\delta_{e, \text{all}} = \frac{1}{62,1} \frac{\sigma_{pm, i}}{E_p} \sigma_{pm, \infty} \cdot \varnothing \text{ при } \alpha = 3. \quad (13)$$

Наиболее благоприятное значение выбирается в зависимости от расчетной ситуации.

Необходимо отметить, что СНБ 5.03.01 [4] и EN 1991-1-1 [8] также рекомендуют определять верхнее и нижнее значения длины зоны передачи напряжений ( $l_{pt1} = 0,8 \cdot l_{pt}$  и  $l_{pt2} = 1,2 \cdot l_{pt}$ ). Такие значения приняты на основании рекомендаций по результатам исследований Wölfel и Krüger [15] и предполагают учесть погрешности, возникающие по измеренным средним относительным деформациям бетона.

Здесь следует обратить внимание на несколько странную ситуацию, возникающую при определении такого важного показателя в законах сцепления, как прочность бетона на растяжение. Это подчеркивалось также и в работе [14].

Так, при определении расчетной длины зоны передачи напряжений в ф. (8) участвует расчетное сопротивление бетона к моменту времени  $t$ , определяемое в зависимости от средней прочности бетона  $f_{ctm}(t)$  согласно СНБ 5.03.01 по формуле:

$$f_{ctd}(t) = \frac{0,7 f_{ctm}(t)}{\gamma_c}. \quad (14)$$

Принимая условие, что передаточная прочность составляет не менее 80 % от прочности в возрасте 28 суток, получаем:

$$f_{ctd}(t) = \frac{0,8 \cdot f_{ctk}}{\gamma}. \quad (15)$$

В этом случае введение  $\gamma = 1,5$  хотя и выглядит странным при расчете длины зоны передачи напряжений, но введено с определенной целью. С другой стороны, введение дополнительных коэффициентов 0,8 и 1,2 к базовой длине зоны передачи напряжений теряет смысл. Поэтому, применительно к назначению контрольных величин втягивания канатов с использованием подходов, рекомендованных EN 1169 [23] для плит безопалубочного формирования, в расчетных зависимостях (5) и (6) следует использовать не расчетную, а базовую длину зоны передачи напряжений, определенную при среднем, а не расчетном сопротивлении бетона на растяжение.

При этом среднее значение сопротивления следует устанавливать по результатам испытания контрольных образцов к моменту передачи усилия обжатия. Тогда при передаточной прочности 40 МПа средняя прочность на растяжение должна составлять  $f_{ctm}(t) = 2,9$  МПа, а базовая длина зоны передачи напряжений:

$$l_{pt} = 1 \cdot 0,19 \frac{\sigma_{pm,0}}{1 \cdot 3,2 \cdot 2,9} \varnothing = \frac{\sigma_{pm,0}}{48,8} \varnothing.$$

Для плит безопалубочного формирования при максимально установленных начальных напряжениях с учетом потерь  $\sigma_{pm,0} = 1100$  МПа, базовая длина зоны передачи напряжений составит:

$$I_{pt} = \frac{1100}{48,8} = 22,5 \varnothing_{nom} \quad (16)$$

Верхнее предельное значение  $I_{pt}$  с учетом отклонений ( $k = 1,3$ ) может быть принято равным:

$$I_{pt} = 30 \cdot \varnothing_{nom} \quad (17)$$

Данная величина может быть использована при контроле плит безопалубочного формования при следующих условиях:

- величина передаточной прочности не менее  $f_{ctm}(t) = 40$  МПа;
- величина начальных напряжений после передачи усилия обжатия не более 1100 МПа.

На рис. 5 представлено сравнение фактических и расчетных значений величин втягивания канатов, вычисленных с учетом принятых ранее предпосылок по СНБ 5.03.01 [4] и ACI 318 [5] применительно к плитам безопалубочного формования. Опытные данные взяты из работы [20].

Как видно из представленного сравнения (см. рис. 5) обе методики дают достаточно консервативный результат при оценивании длины зоны передачи напряжений, применительно к результатам, полученным для канатов  $\varnothing = 12,7$  мм.

**Заключение.** Для контроля длины зоны передачи напряжений по величине втягивания канатов в процессе изготовления плит безопалубочного формования могут быть использованы зависимости, рекомендованные EN 13369 [24]. Принятие коэффициента  $\alpha = 2,5$  в ф. (2) И. Гиона (множитель 0,4 в ф. (5)) можно считать обоснованным, что подтверждается опытными данными [20]. В расчетной зависимости (8) следует использовать базовую длину зоны передачи напряжений, определенную при средней прочности бетона на растяжение к моменту времени, соответствующему передаче обжатия. Для оговоренных условий можно назначать при контроле  $I_{pt} = 30 \varnothing_{nom}$ .

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пецольд, Т.М. Безопалубочное формование на длинных стендах предварительно напряженных многпустотных плит / Т.М. Пецольд, В.В. Тур // Строительная наука и техника. – 2006. – № 6. – С. 27–30.
2. Gyon (1951) – Béton Précontraint. – Paris, 1951.
3. Бетонные и железобетонные конструкции: СНБ 5.03.01.
4. Бетонные и железобетонные конструкции: СНиП 2.03.01–84\*.
5. ACI Manual 318R–86 art. 12.9 – Interim, 1990 – USA – 278 p.
6. AASHTO. American Association of State Highway and Transportation Officials/ Standard Specification for Highway Bridges. – 16<sup>th</sup> Edition, Washington D.C., 1996 – art. 9.28.
7. British Standard BS8110: Part 1: 1997, Section Four, art. 4.10.
8. EN 1992–1–1. General Rules and Rules for Buildings: Section Four, art. 4.10.
9. NEN6720–1991. NNI Netherlands, art. 9.7, page 203.
10. PN–84/B–03264, art. 8.2.3.
11. DIN 1045, art. 8.4.1.
12. Bond of reinforcement in concrete. State-of-art prepared by Task Group Bond Models (former CEB Task Group 2.5/fib report 100 (2000) – August, 2000. – Ch. 6 – 120 p.
13. Bruggeling A.S.G. Transmission of prestress by bond/ Internal Report of TG9.4 to Commission. – 2000 – 37 p.
14. Bruggeling. Manual "Theorie en Praktijk van het voorgespannen beton", 2 volumes 10050 p. – t. Koggeschip.
15. Bruggeling. The transmission length of pretensioning prestressed steel. Proceeding Tenth International Congress of FIP, part 4, New-Delhi, India, 1986, page 117/127.
16. Lopez M.R., Carmo N.F. Bond of prestressed strands to concrete: transfer rate and relationship between transmission length and tendon draw-in/ Structural Concrete. – 2002, N 3 – p. 117–126.
17. PCI Manual for the design of Hollow Core Slabs/ Second Edition, PCI, Chicago, 1988 – 120 p.
18. Quality Assurance and Recommended Connections of Prestressed Hollow Core Slabs – BSI, London, 1998.
19. СТБ 1383. Плиты покрытий и перекрытий железобетонные для зданий и сооружений. Технические условия.
20. Marti-Vargas J.R., et. Reliability of Transfer Length Estimation from Strand End Slip/ ACI Structural Journal/ July–August 2007. – Technical Paper # 104–S47 – p. 487–494.
21. Oh B.H., Kim E.S., Kim S.K. Correct Prediction of Transfer Length in Pretensioned Prestressed Concrete Structures// Transactions, SMIRT16, Washington, DC, August 2001, Paper # 1545. – p. 1–8.
22. D.R. Rose, B.W. Russel. Investigation of Standardized Tests to Measure the Bond Performance of Prestressing Strand// PCI Journal. – July–August, 1997. – p. 56–62.
23. EN 1168:2006 – Precast Concrete Products – Hollow Core Slabs.
24. EN 13369 – Common rules for precast concrete products.
25. Тур, В.В. О нормировании величины втягивания канатов при изготовлении плит пустотного настила по технологии безопалубочного формования / В.В. Тур, Т.М. Пецольд // Проблемы современного бетона и железобетона. – Ч. 1 – Бетонные и железобетонные конструкции – С. 458–478.
26. Бетонные и железобетонные конструкции. Нормы проектирования: СНиП 2.03.01–84\*.

28.12.09

#### TUR V.V. The control of length of a zone of transfer of pressure on size draw of straining elements in technology of manufacturing previously of intense designs

Clause is devoted to a problem appraisal of length of a zone of transfer of pressure and appropriate size draw of ropes by transfer drafting from straining elements on concrete. Are considered and the known now approaches to the decision of a problems based in basic on experimental researches of the various authors, saved for last some decades, and also requirements established by the international normative documents (EN 1168, EN 13369, EU-2, ACI 318) are generalized.

On the basis of the executed analysis is shown, that in monitoring systems of quality of products without sheathing forming the size draw of a rope can be used as norm parameter at an estimation of conformity.

Thus as against the requirements EN 1168 it is recommended at definition of base length of a zone of transfer of pressure to use not settlement, but average resistance of concrete at a stretching, that in conditions of the factory control gives more adequate result. The meaning of factor and  $\alpha = 2,5$  in the formula And is shown, that. Giyona, accepted in EN 13369, well describes dependence connecting length of a zone of transfer of pressure and size draw of a rope.